

# 22117 回风巷围岩塑性区及 松动破坏特征分析

唐满元<sup>1</sup>, 苗晓伟<sup>1\*</sup>, 李青锋<sup>2</sup>, 彭跃金<sup>2</sup>

(1. 潞宁煤业有限责任公司, 山西 忻州 036700; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 本文以潞宁煤业 22117 回风巷为研究对象, 通过数值模拟及现场钻孔窥视等手段对巷道围岩塑性区及松动破坏特征进行分析。结果显示: 不同埋深条件以及不同煤柱宽度条件下, 巷道围岩塑性区发育情况不同; 巷道断面上帮围岩松动破坏范围较大, 下帮较小, 顶板完好。说明在 22117 回风巷掘进后, 上区段 22115 采空区基本顶继续回转对巷道围岩变形影响较为严重, 上帮锚杆(索)支护效果较差, 需进一步优化锚杆(索)支护参数, 同时下帮采用锚索支护, 以确保巷道围岩的稳定性。

**关键词:** 钻孔窥视; 数值模拟; 塑性区; 松动圈

**中图分类号:** TD322      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2020)03-0014-07

## Characteristic Analysis of Surrounding Rock Plastic Zone and Loosening Circle of 22117 Return Airway

Tang Manyuan<sup>1</sup>, Miao Xiaowei<sup>1</sup>, Li Qingfeng<sup>2</sup>, Peng Yuejin<sup>2</sup>

(1. Luning Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou 036700, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** This paper takes Luning Coal Industry 22117 return air lane as the research object, through numerical simulation and on-site borehole peeping and other methods to analyze the plastic zone of the roadway surrounding rock and the characteristics of loose failure. Results show that under different burying depth conditions and different coal pillar width conditions, the development of plastic zone of the surrounding rock of the roadway is different; the surrounding rock of the roadway section is loose and the damage range is larger, the lower wall is small, and the roof is intact, indicating that in 22117 return air lane after being excavated, the continued rotation of the basic roof of the 22115 goaf in the upper section has a serious effect on the deformation of the surrounding rock of the roadway. The effect of the upper bolt (cable) support is poor. It is necessary to further optimize the support parameters of the bolt (cable) and support the anchor cable to ensure the stability of the surrounding rock of the roadway.

**Keywords:** drilling peep; numerical simulation; plastic zone; loose circle

巷道围岩塑性区形态决定了巷道围岩的破坏形式及破坏程度。马念杰等<sup>[1]</sup>通过对巷道围岩塑性区形态及变化规律的研究,发现在不同围压状态下均质围岩圆形巷道塑性区一般表现出圆形、椭圆形、蝶形 3 种形态。张继华等<sup>[2]</sup>通过分析松散软岩巷道失稳机理得出巷道围岩塑性区半径随着初始支护强度与原始地应力比值的增加逐渐减小,但塑性区范围仍然很大。曹吉胜等<sup>[3]</sup>通过对影响参数敏感性因素分析并进行

线性回归,得出塑性区宽度与各影响因素的关系式,为深部条带开采设计提供参考.KASTNER<sup>[4]</sup>依照弹性理论求解得到塑性区边界的近似隐式方程,此法在“蝶形塑性区”理论<sup>[5-10]</sup>得到了很好的继承、发展与应用,为巷道稳定性评估及支护方案的设计等提供了有力的理论支撑.松动圈是巷道稳定性判别和支护设计的重要依据,对于保障巷道施工安全具有重要意义<sup>[11]</sup>.徐世达等<sup>[12-14]</sup>通过测试深部巷道围岩松动圈厚度,揭示了其分布特征及演化规律.杨凡等<sup>[15]</sup>对巷道围岩松动圈演化规律进行了现场监测,为围岩松动圈范围及锚杆支护参数的确定提供可靠依据,具有较高的工程实用价值.但对于不同的地质条件以及开采方式,巷道塑性区及松动破坏特征不尽相同,因此本文以潞宁煤业 22117 回风巷为研究对象,对巷道围岩塑性区及其松动破坏特征进行分析,为 22117 回风巷围岩控制提供指导作用.

## 1 巷道围岩塑性区数值模拟研究

### 1.1 建立模型

根据矿山资料显示,潞宁煤业公司 22117 工作面位于侏罗系大同组上部的 2<sup>#</sup>煤,处于井田二二采区中下部,上部为二二采区 22115 采空区,煤柱 15 m,下部为二二采区 22119 回采工作面,未形成回采工作面.22117 工作面区域地层整体为南东向倾斜的单斜构造,煤层走向 N48°W,倾向 S138°E,且工作面区域内煤层结构简单,中部夹不连续的薄层炭质泥岩夹矸,煤层平均厚度 3.6 m.煤层上覆顶板大同组由下往上依次主要为细粒砂岩(以长石为主)、砂质泥岩、粉砂岩、中粒砂岩、细粒砂岩(以石英为主),总厚 42 m.

为研究巷道围岩塑性区的发育情况,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值分析软件进行模拟,为进行尽可能理想的数值模拟,对煤层采用应变硬化/软化模型,对其他岩层则均采用常规摩尔-库伦模型.模型整体尺寸为 100 m×15 m×66.5 m,共划分为 798 000 个网格.其中,巷道尺寸为 4.5 m×3.6 m,煤柱宽度为 15 m,采空区设计开挖 30 m 左右,岩层上部按不同埋深施加应力,容重取 25 kN/m<sup>3</sup>,模型图如图 1 所示,煤岩层物理力学参数如表 1 所示.

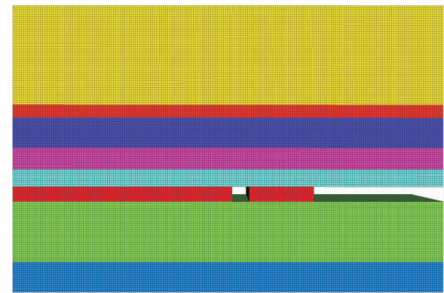


图 1 数值模型

表 1 煤岩层物理力学参数

岩层	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	体积模 量/GPa	剪切 模量/GPa	抗拉强 度/MPa	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
中粒砂岩	2 340	14.22	5.15	4.06	4.67	30
粉砂岩	2 650	12.00	8.18	4.30	8.99	36
砂质泥岩	2 659	2.51	1.36	2.34	1.90	21
2 <sup>#</sup> 煤层	1 400	3.50	2.21	1.70	1.21	20
泥岩	2 240	2.33	1.47	1.50	2.36	21
细粒砂岩	2 600	11.97	8.27	3.00	9.30	34

### 1.2 同一煤柱宽度不同埋深条件下塑性区发育情况

根据潞宁煤业矿山地质资料及地表地形图选取 6 种不同埋深条件对围岩塑性区进行分析,如图 2 所示为不同埋深条件下围岩塑性区发育情况.

根据模拟结果显示,图 2a 所示煤的埋深为 437.5 m,此时煤柱靠近巷道一侧出现 0.8~1.2 m 的塑性区,靠近采空区一侧出现 3.5~4.0 m 的塑性区;图 2b 所示煤的埋深为 475 m,此时煤柱靠近巷道一侧出现 1.3~1.8 m 的塑性区,靠近采空区一侧出现 4.5~5.0 m 的塑性区;图 2c 所示煤的埋深为 512 m,此时煤柱靠近巷道一侧出现 2.0~2.5 m 的塑性区,靠近采空区一侧出现 5.5~6.0 m 的塑性区;图 2d 所示煤的埋深为 520 m,此时煤柱靠近巷道一侧出现 2.7~3.2 m 的塑性区,靠近采空区一侧出现 6.5~7.5 m 的塑性区;图 2e 所示煤的埋深为 544 m,此时煤柱靠近巷道一侧出现 3.0~4.0 m 的塑性区,靠近采空区一侧出现 7.5~

8.0 m的塑性区;图 2f 所示煤的埋深为 566 m,此时煤柱靠近巷道一侧出现 4.5~5.0 m 的塑性区,靠近采空区一侧出现 8.5~9.0 m 的塑性区.图 2a~图 2f 可以看出顶板基本没有发生破坏,煤体侧塑性区大小基本处于 0.8~1.2 m 内.由此可见,随着煤层埋深逐渐增加,22117 回风巷煤柱塑性区逐渐增加,顶板及煤体侧塑性区基本没有变化.同时,为研究同一埋深条件下,不同煤柱宽度时塑性区的发育情况,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值软件做了进一步分析.

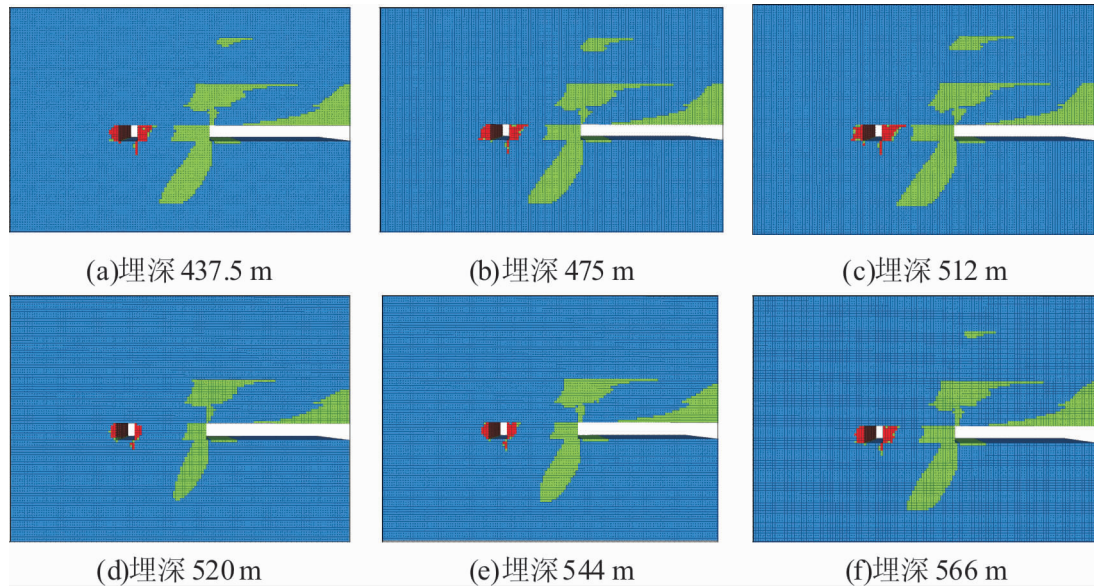


图 2 不同埋深条件下围岩塑性区发育情况

### 1.3 同一埋深条件下不同煤柱宽度塑性区发育情况

为进一步了解上覆岩层压力作用下围岩塑性区的发育情况,选取巷道埋深位于 550 m 的位置,分别取 10,12,18,20 m 煤柱为研究对象进行模拟,如图 3 所示.

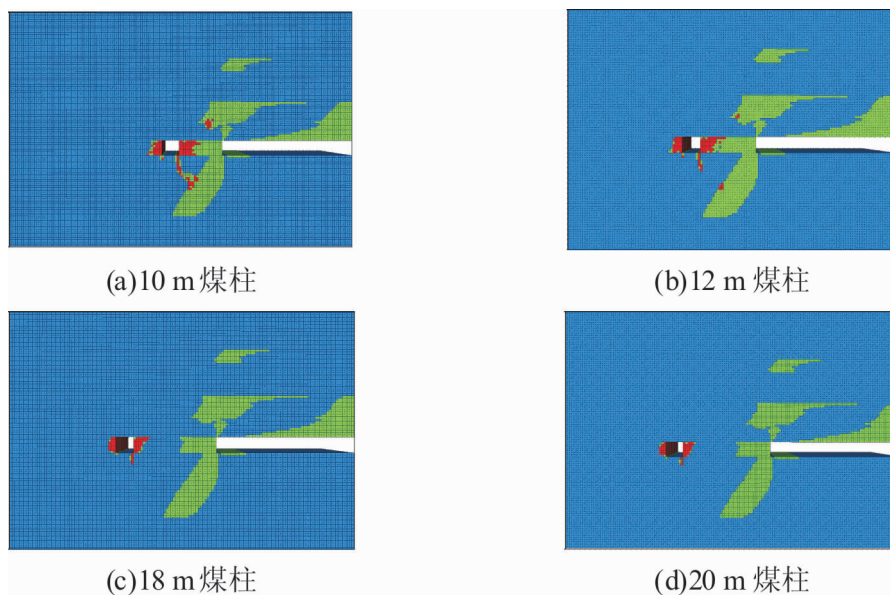


图 3 同一埋深条件下不同煤柱宽度的塑性区发育情况

根据模拟结果显示,图 3a 煤柱宽度 10 m 的情况下,煤柱靠近巷道一侧塑性区范围在 4 m 左右,而煤柱靠近采空区一侧塑性区范围在 7 m 左右,煤柱两侧塑性区出现叠加现象;图 3b 煤柱宽度 12 m 的情况下,煤柱靠近巷道一侧塑性区范围在 3.5~4.0 m,而煤柱靠近采空区一侧塑性区范围在 8 m 左右,煤柱两侧塑性区同样出现叠加现象;图 3c 煤柱宽度 18 m 的情况下,煤柱靠近巷道一侧塑性区范围在 3.5~4.0 m,



而煤柱靠近采空区一侧塑性区范围在9 m左右,煤柱两侧塑性区相距较远;图3d煤柱宽度20 m的情况下,煤柱靠近巷道一侧塑性区范围在3.0~3.5 m,而煤柱靠近采空区一侧塑性区范围在8.0~8.5 m,煤柱两侧塑性区相距较远.而图3a~图3d可以看出顶板基本没有发生破坏,煤体侧塑性区大小基本处于1.5~3.5 m.由此可见,在同一埋深条件下,煤柱侧塑性区发育随着煤柱宽度增加到一定值时,煤柱侧塑性区范围稳定后逐渐降低,而弹性核区范围随着煤柱宽度增加而逐渐增加,但顶板及煤体侧塑性区基本没有变化.

综上所述,在同一煤柱宽度条件下,随着煤层埋深逐渐增加,煤柱塑性区范围逐渐增加,但弹性核区范围随着煤层埋深逐渐增加而减小;在同一埋深条件下,煤柱侧塑性区发育随着煤柱宽度增大到一定值时,煤柱侧塑性区范围稳定后逐渐降低;但是,弹性核区范围随着煤柱宽度的增加会逐渐增加;不管哪种条件下,顶板及煤体侧均处于稳定状态.

## 2 巷道围岩钻孔窥视

### 2.1 探测断面布置

为进一步验证模拟的正确性,在22117回风巷设置两个监测断面(断面1和断面2)进行围岩钻孔窥视,钻孔窥视断面布置如图4所示,断面1距回风巷入口处584.8 m,包括4个探测孔,分别为顶板上2个探测孔,孔深为15 m;上帮1个探测孔,孔深为10 m;下帮1个探测孔,孔深为6 m;断面2距回风巷入口处530.8 m,共3个钻孔,分别为1个顶板孔,孔深为15 m;上帮1个探测孔,孔深为10 m;下帮1个探测孔,孔深为6 m.

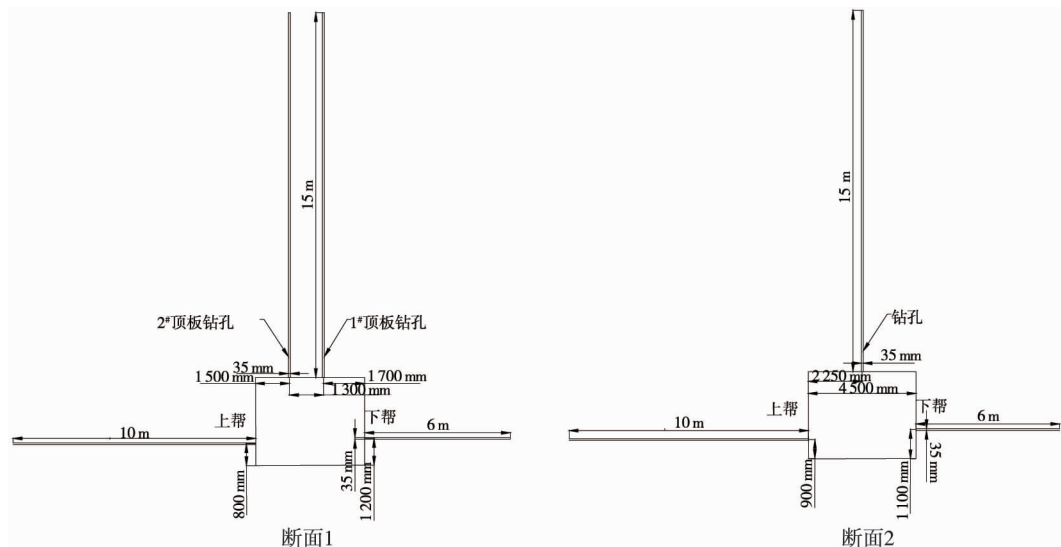


图4 钻孔窥视断面布置

### 2.2 探测结果分析

#### 2.2.1 断面1窥视结果分析

图5和图6分别为断面1中的1#顶板孔和2#顶板孔的窥视结果.根据断面1窥视结果可以看出,1#顶板孔0~3.4 m内顶板完整无裂隙出现,3.4~3.8 m内出现少量的横向裂纹,并不影响顶板的完整性,3.8~5.4 m内顶板岩层十分完整,无裂纹产生,在5.4 m左右,顶板探测孔逐渐出现对称的裂纹,并贯穿整个顶板孔,疑似顶板断裂线,除此之外顶板完整;从2#顶板孔围岩探测结果可以看出,0~2 m内顶板完整无裂隙出现,2~3.5 m内出现少量的纵向裂纹,并不影响顶板的完整性,在3.5 m左右,顶板探测孔逐渐出现对称的裂纹,并贯穿整个顶板孔,疑似顶板断裂线,除此之外顶板完整.由图5和图6结合22117回风巷掘进作业规程可确定,直接顶厚度3.5 m左右,其中中细粒砂岩1.5 m,砂质泥岩2.5 m;基本顶(粉砂岩)厚度大于10 m;顶板围岩松动圈在1.0 m以下,掘进对顶板围岩松动圈的影响较小.但是,上邻近22115工作面开采使基本顶在倾向上的

弯、拉断裂线位于 22117 回风巷顶板,其断裂角  $\text{atan}(1.9/1.3) = 55.6^\circ$ .

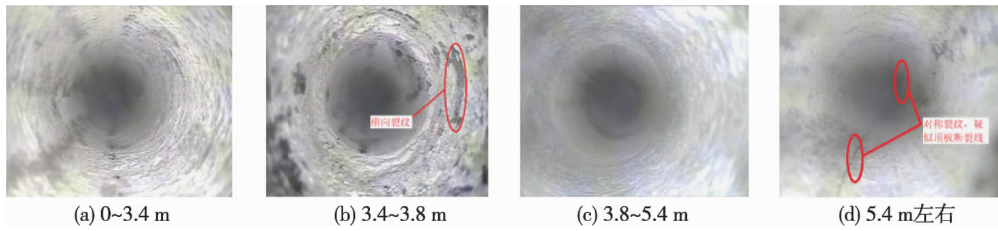


图 5 1#顶板孔窥视(断面1)

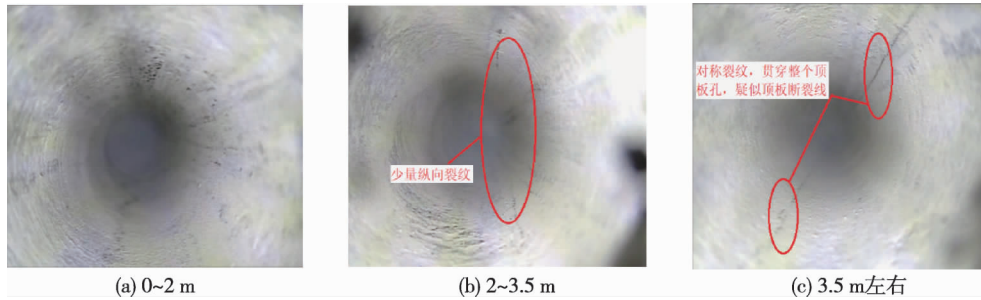


图 6 2#顶板孔窥视(断面1)

如图 7 所示,从上帮探测孔围岩探测结果可以看出,0~1.0 m 内围岩较为完好;1.2~1.5 m 内围岩出现横向裂纹;2.0~2.5 m 内围岩出现纵向裂纹,孔壁有煤体落下;2.5~3.1m 内围岩横向裂纹增多,较为破碎;3.6~4.0 m 内围岩纵向裂纹增多,孔壁煤体部分掉落,较破碎;4.0~6.4 m 内围岩纵向裂纹继续发育,孔壁煤体掉落较多,纵向裂纹深度增加,围岩破碎;在 7.0 m 之后围岩较为完整,无裂纹出现.由此可以看出围岩松动圈介于 2.5~6.5 m.结合上帮 2.4 m 长的锚杆(锚固长度 1.2 m)可得到,巷道上帮锚杆支护效果好,尤其是 0~1.2 m 内煤体在锚杆的高预应力作用下围岩较为完好.但是,因锚索锚固粘结内煤体松动破坏,锚索部分锚固失效,故在 2.5~4.0 m 内围岩破碎.

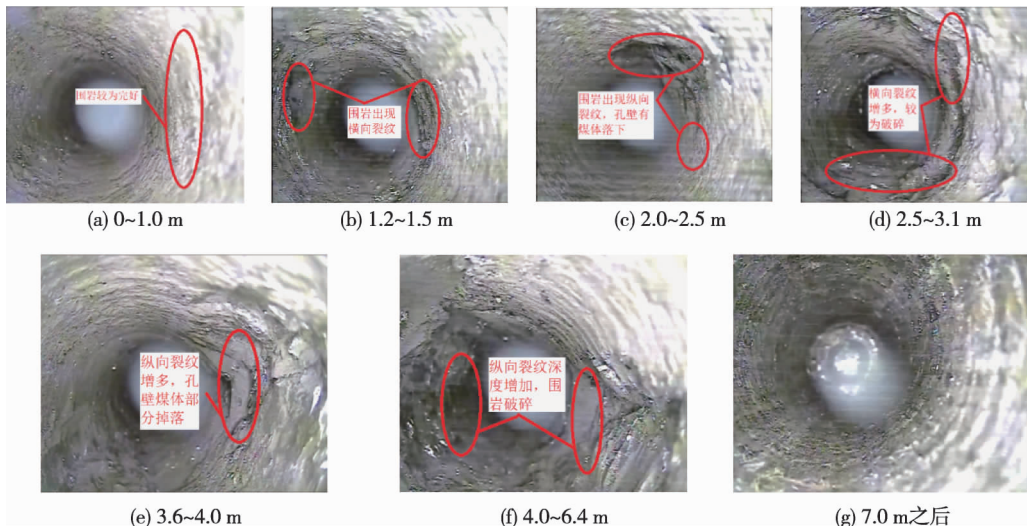


图 7 上帮孔窥视(断面1)

如图 8 所示,从下帮探测孔围岩探测结果可以看出,0~1.0 m 内围岩较为完好;1.5~2.1 m 内围岩出现纵向裂纹;2.5~3.3 m 内围岩纵向裂纹扩展,煤体较完整;3.5~4.0 m 内煤体较松散,并有少量煤体离层脱落;4.0~5.0 m 内煤体出现较为严重的煤体破碎脱落、离层现象;5.5~6.0 m 内离层现象减少,煤体内仍然较为破碎.由此可得知,下帮锚杆支护对围岩控制效果较好,但在煤体深部非锚固区 3.5~5.0 m 内围岩破坏严重.



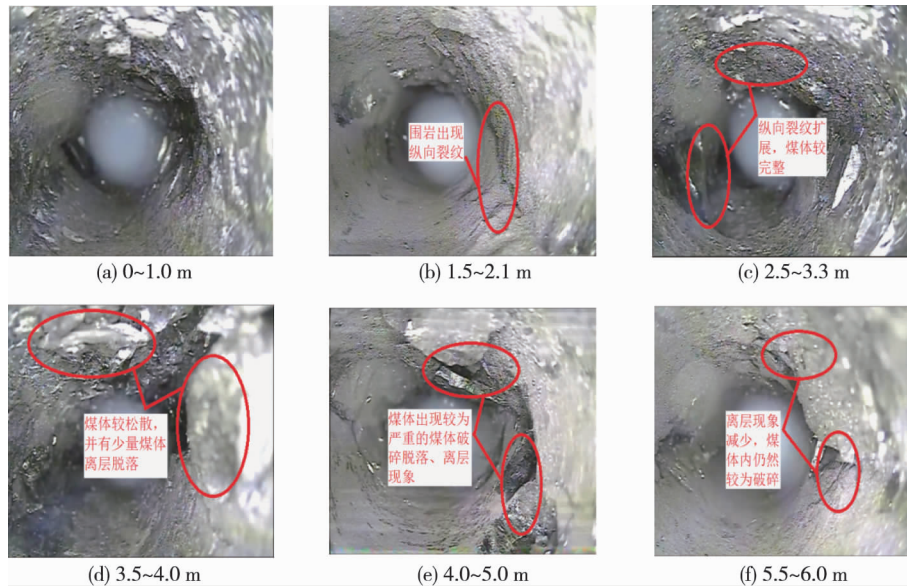


图8 下帮孔窥视(断面1)

综上所述,断面1巷道上下帮围岩松动圈非常大,受22115采空区基本顶弯曲下沉的影响严重,与上述数值模拟结果吻合.因上帮锚索支护效果较差,需优化锚索支护参数,同时在下帮锚索支护.

2.2.2 断面2窥视结果分析

如图9所示,根据断面2窥视结果可以看出,整个顶部探测孔围岩较为完整,没有出现裂纹,观测中仅有在不同岩层之间出现少量的夹层,顶板围岩松动圈在1.0 m以下,掘进对顶板围岩松动圈的影响较小.

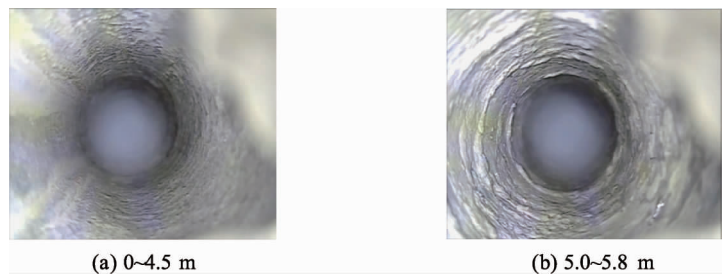


图9 断面2顶板孔窥视

如图10所示,从上帮探测孔围岩探测结果可以看出,0~1.2 m内围岩较为完好;

1.2~1.5 m内围岩出现纵向裂纹;2.3~2.9 m内围岩出现横向裂纹,煤体较破碎;3.3~4.0 m内围岩横向裂纹增多,煤体破碎,孔壁塌落较多;4.4~5.5 m内孔径缩小、孔壁塌落,煤体极为破碎;6.0~6.5 m内孔壁的煤体全塌落,孔径缩小较大,无法继续探测.由此可以看出围岩松动圈大于6.5 m.钻孔窥视结果表明,巷道上帮锚杆支护效果好,尤其是0~1.2 m内煤体在锚杆的高预应力作用下围岩完好.但是,因锚索锚固粘结内煤体松动破坏,锚索部分锚固失效,故在2.5~4.0 m内围岩破碎.

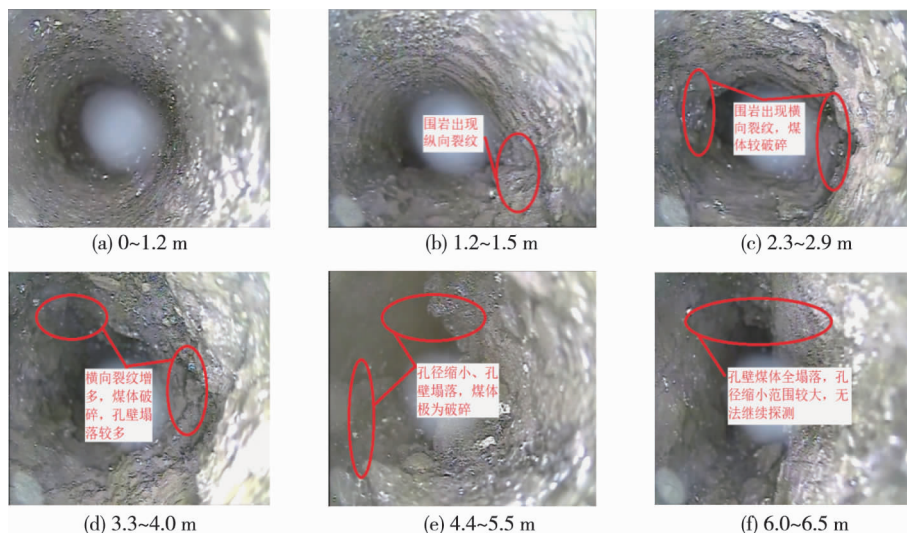


图10 断面2上帮孔窥视

如图 11 所示,从下帮探测孔围岩探测结果可以看出,0~1.0 m 内围岩较为完好,2.6~3.1 m 内围岩出现横向裂纹,3.6~4.4 m 内围岩纵向裂纹增多.由此可得知,下帮锚杆支护对围岩控制效果较好,但在煤体深部非锚固区 2.6~4.0 m 内围岩裂隙较发育.

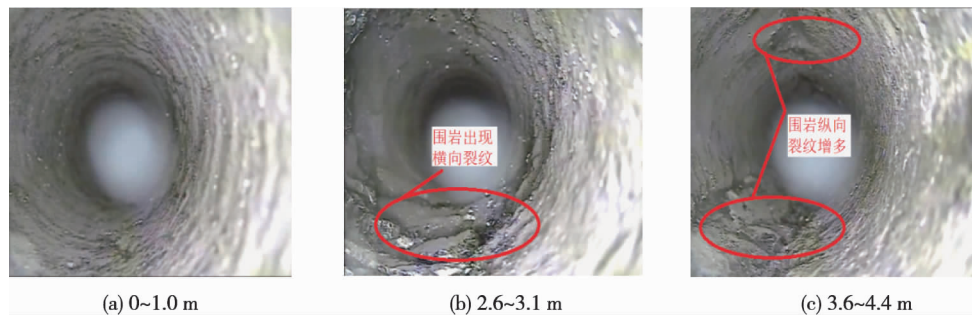


图 11 断面 2 下帮孔窥视

综上所述,断面 2 巷道上帮围岩松动圈的影响非常大,下帮较小,说明受 22115 采空区基本顶弯曲下沉的影响严重,与断面 1 窥视结果及上述数值模拟结果吻合.故为了巷道围岩稳定性,应优化锚杆(索)的支护参数,以加强巷道上、下两帮的围岩控制.

### 3 结论

- 1) 不同条件对于煤柱塑性区范围的影响较大,而对于巷道顶板及煤体塑性区范围影响较小.
- 2) 钻孔窥视显示,上帮围岩受上覆岩层弯曲下沉影响严重,下帮次之,巷道顶板受影响相对较小.
- 3) 数值模拟及钻孔窥视综合对比发现,22117 回风巷煤柱受上覆岩层弯曲下沉影响破碎严重,需及时对其进行支护,并应适时增加锚索对上帮围岩加强支护.

#### 参考文献:

- [1] 郭晓菲,马念杰,赵希栋,等.圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J].煤炭学报,2016(8):1871-1877.
- [2] 张继华,王连国,朱双双,等.松散软岩巷道围岩塑性区扩展分析及支护实践[J].采矿与安全工程学报,2015(3):89-94.
- [3] 曹吉胜,马少杰,马德鹏,等.基于正交设计的深部条带煤柱塑性区宽度影响因素分析[J].矿业安全与环保,2013(5):115-117.
- [4] Kastner H.隧道与坑道静力学[M].上海:上海科学技术出版社,1980:56-61.
- [5] 赵志强.大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [6] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等.巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):969-978.
- [7] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
- [8] 郭晓菲,马念杰,赵希栋,等.圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(8):1871-1877.
- [9] 陈立伟,彭建兵,范文,等.基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J].煤炭学报,2007,32(1):20-23.
- [10] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [11] 靖洪文,宋宏伟,郭志宏.软岩巷道围岩松动圈变形机理及控制技术研究[J].中国矿业大学学报,1999,28(6):560-564.
- [12] 徐世达,皇甫凤成,雷刚,等.深部采场开采扰动下巷道围岩松动圈演化规律研究[J].金属矿山,2019(11):14-19.
- [13] 王守慧,雷刚,李健,等.声波探测技术在围岩松动圈探测上的研究与应用[J].建筑结构,2019,49(s2):759-762.
- [14] 靖洪文,李元海,梁军起,等.钻孔摄像测试围岩松动圈的机理与实践[J].中国矿业大学学报,2009,38(5):645-649.
- [15] 杨凡,武宇.矿山回采巷道围岩松动圈空间效应研究[J].世界有色金属,2019(11):27-28.